

I.1. INTRODUCTION :

I.1.1. Définition :

Le mot « rhéologie » (du grec : $\rho\acute{\epsilon}\tilde{\iota}\nu$, s'écouler) a été proposé par Eugene Cook Bingham, en 1928, pour désigner « la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière ». Plus exactement, l'objet de la rhéologie est l'étude du comportement mécanique, c'est-à-dire des relations entre les déformations et les contraintes de la matière. Ensuite, s'appuyant sur la connaissance de ce comportement, on calculera, grâce à la mécanique des milieux continus, la répartition non uniforme des contraintes et des déformations dans un corps sous l'effet des forces extérieures. Dans ses calculs pratiques, l'ingénieur fait appel aux disciplines appliquées, telles la résistance des matériaux et l'hydraulique.

En réalité, la rhéologie a été créée pour répondre aux besoins de la technologie moderne ; les différentes branches de la mécanique développées au XIX^e siècle (l'élasticité, la plasticité, la mécanique des fluides). Ainsi que l'impuissance de la mécanique des fluides et des solides à décrire et expliquer les propriétés des matériaux ou comportement intermédiaire entre celui du fluide Newtonien et celui de solide plastique [6].

I.1.2. Différentes propriétés étudiés par la rhéologie :

La rhéologie est l'étude du changement de la forme et de l'écoulement sous l'effet des contraintes, Cette étude comprend : l'élasticité, la plasticité et la viscosité

a - Elasticité : Quand on applique une force à une matière, cette dernière subira une déformation. Quand on supprime la force, si la matière retourne à son état initial, nous sommes en présence d'une matière élastique. Si cette matière est un fluide, n'importe quel système de forces va engendrer un écoulement. Quand on supprime cette force, le fluide ne revient pas à son état initial .le fluide n'est donc pas élastique.

b – Plasticité : Un fluide auquel on doit appliquer une force supérieure au seuil de cisaillement pour qu'il puisse s'écouler, est un fluide plastique. Si la contrainte appliquée est inférieure au seuil de cisaillement, ce fluide a un comportement élastique.

Le seuil de cisaillement est donc la contrainte au-dessous de laquelle le fluide a un comportement élastique.

c – Viscosité : La viscosité peut être définie comme étant la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. La viscosité dynamique représente la contrainte de cisaillement nécessaire pour produire un gradient de vitesse d'écoulement d'une unité dans la matière. Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue. [4]

I.1.3. Notion de viscosité :

I.1.3.1 Définition de la viscosité :

La viscosité est le critère qui différencie un fluide réel d'un fluide parfait. Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et des forces d'interaction et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. On dit qu'il existe un profil de vitesse [7].

Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement, la courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse.

Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance z de cette couche au plan fixe : $v = v(z)$.

I.1.3.1.1 Viscosité dynamique – loi de newton :

Considérons deux couches contiguës distantes de dz .

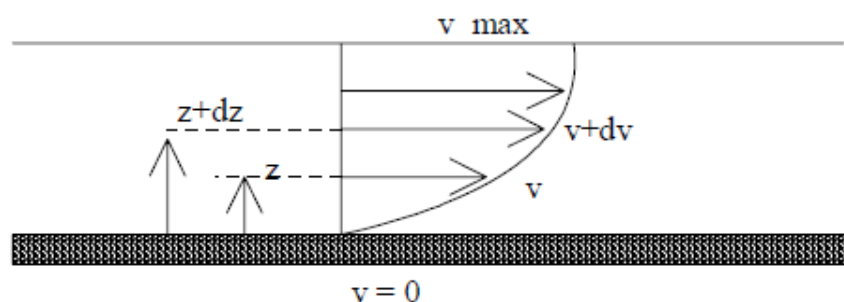


Figure I.1 : Expérience de la plaque mobile.

La force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit dv , à leur surface S et inversement proportionnelle à dz :

$$F = -\eta S \frac{dv}{dz} \quad (I.1)$$

Le facteur de proportionnalité η est le coefficient de viscosité dynamique du fluide [3].

Le tableau I.1 représente des valeurs de viscosité de quelques substances [3].

| Matériaux | Viscosité (Pa.S) |
|------------------|------------------|
| Air | 10^{-5} |
| Eau | 10^{-3} |
| Huile d'olive | 10^{-1} |
| Glycérine | 1 |
| Polymères fondus | 10^3 |
| Bitume | 10^8 |

Tableau I.1. Quelques valeurs de la viscosité de substances usuelles à température ambiante.

I.1.3.1.2 Viscosité cinématique :

Le coefficient de viscosité cinématique est défini à partir du coefficient de viscosité dynamique η par la relation [1].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{I.2})$$

Où ρ est la masse volumique du fluide.

I.1.3.1.3 Viscosité utilisée dans l'étude des solutions [3] :

a) Viscosité relative :

La viscosité relative est le quotient de la viscosité de la solution par la viscosité du solvant :

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_s} \quad (\text{I.3})$$

Avec : η_r la viscosité relative,
 η_s la viscosité dynamique du solvant,
 η la viscosité dynamique de la solution.

b) Viscosité spécifique :

La viscosité spécifique est exprimée par la formule suivante :

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_s}{\eta_s} \quad (\text{I.4})$$

I.1.4. Equation d'état de la rhéologie :

La détermination de ces deux grandeurs (contrainte de cisaillement et déformation ou vitesse de cisaillement) permet de définir l'équation rhéologique d'état du matériau, c'est-à-dire la relation les unissant ($\gamma = f(\tau)$ ou bien $\dot{\gamma} = f(\tau)$). Les rhéogrammes sont les courbes traduisant graphiquement l'équation rhéologique d'état du matériau. La représentation la plus courante consiste à exprimer la variation de la contrainte de cisaillement avec celle de la vitesse de cisaillement.

I.2. NOTIONS ELEMENTAIRES :

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer, les mouvements des différents points du matériau dépendant bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées. Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré pour certaines distributions de ces forces. Au cours d'un tel mouvement, on considère que le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes. La déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre.

I.2.1. Contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement τ est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, elles sont appelées force de cisaillement.

En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement τ par l'équation:

$$\tau = \frac{dF}{dt} \quad (I.5)$$

τ : représente une force par unité de surface, elle s'exprime en (N/m^2) ou bien plus commodément en Pascal (Pa) et dS est la surface élémentaire de l'entité considérée.

La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau. Elle varie en général d'une couche à l'autre mais est constante en tout point de la même couche [4].

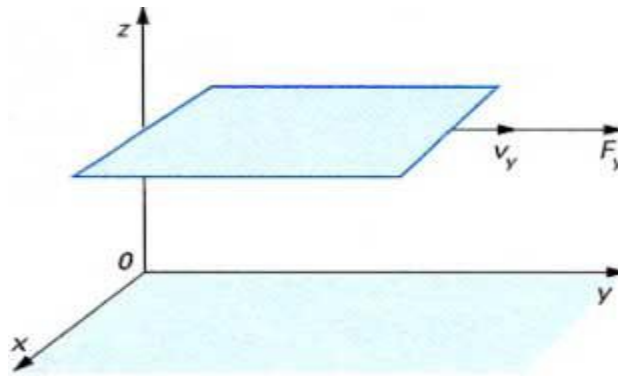


Figure I.2 : Force s'exerçant sur une lame liquide.

I.2.2. La déformation et la vitesse de cisaillement :

La déformation est présentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile.

La vitesse de cisaillement caractérise la variation de la vitesse entre les couches limites et est égale au quotient de la vitesse v et de l'épaisseur z de l'échantillon. La vitesse étant une longueur divisée par un temps, ce quotient s'exprime donc en inverse de seconde (S^{-1}). La valeur de la vitesse de cisaillement dépend par conséquent, non seulement de la vitesse de déplacement de la couche mobile mais aussi, et de façon critique, de l'épaisseur z cisailée. Si cette dernière est faible, on peut atteindre des vitesses de cisaillement très élevées, même avec des vitesses de déplacement relativement faibles, et inversement [3].

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dz} \quad (I.6)$$

Soit

$$\tau = \eta \cdot (\dot{\gamma}) \quad (I.7)$$

L'expression ainsi obtenue relie la contrainte de cisaillement τ au gradient de vitesse $\dot{\gamma}$, appelé aussi vitesse de cisaillement, et à la viscosité de cisaillement η , ou viscosité dynamique. Cette relation n'est valable que si l'écoulement est laminaire, c'est-à-dire si les couches fluides glissent effectivement les unes sur les autres, sans mouvement désordonné [4].

I.3. COMPORTEMENTS RHEOLOGIQUES DES FLUIDES :

On distingue les fluides newtoniens, les fluides non newtoniens indépendants ou dépendants du temps et les fluides viscoélastiques.

I.3.1. Fluides newtoniens :

Les fluides newtoniens montrent un comportement proportionnel.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{I.8})$$

Ils sont caractérisés par des droites de pente $1/\eta$ dans les diagrammes $\dot{\gamma} = f(\tau)$ (appelés rhéogrammes) ou de pente unité en $\log \tau = f(\log \dot{\gamma})$ et par une horizontale dans les diagrammes $\eta = f(\tau)$ ou $\lg \eta = f(\log \tau)$. Parmi les fluides newtoniens on peut citer (eau, Benzine,etc.).

Les rhéogrammes des fluides newtoniens ont l'aspect suivant :

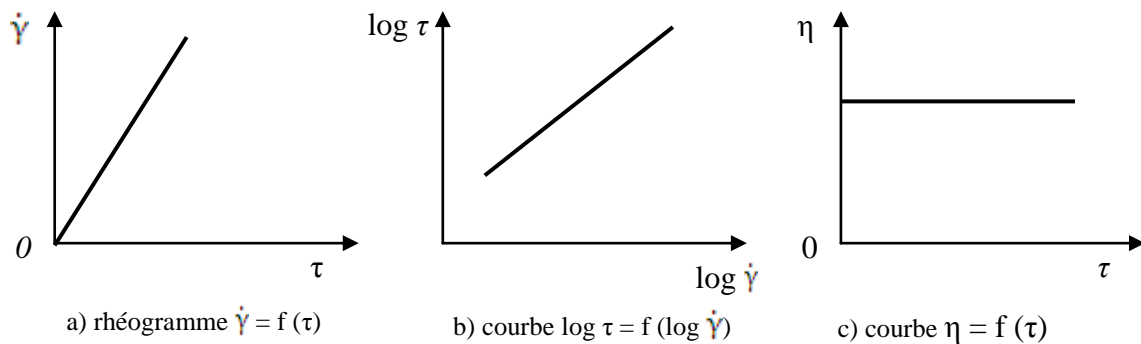


Figure I.3 : Diagrammes caractéristiques des fluides newtoniens [4].

I.3.2. Fluides non newtoniens :

La majorité des fluides présentent toutefois des comportements non-newtoniens qui font appel à l'utilisation de modèles rhéologiques plus complexes pour décrire leur comportement en écoulement.

Dans ce cas la viscosité η n'est pas constante. À chaque valeur du couple ; vitesse de cisaillement, contrainte de cisaillements $(\dot{\gamma}, \tau)$ correspond une valeur de la viscosité η . Dès lors, on parle de la viscosité apparente. Les fluides non-Newtoniens, sont des fluides complexes, comme les fluides ; agro-alimentaires, les polymères, les boues de forage, les laitiers de ciment, etc.

Les fluides non-Newtoniens sont classés en deux grandes parties :

- Fluides non-Newtoniens aux comportements indépendants du temps.
- Fluides non-Newtoniens aux comportements dépendant du temps.

I.3.2.1 Fluides non newtoniens indépendants du temps (sans hystérésis) :

Ce type de corps (fluide) est caractérisé par un comportement indépendant du temps, et pour n'importe quelle vitesse de déformation $\dot{\gamma}$ il y a une fonction univoque de la contrainte de cisaillement τ .

Du point de vue de la viscosité de cisaillement, ces fluides peuvent se classer assez grossièrement en trois catégories

I.3.2.1.1 Fluides rhéofluidifiants ou pseudo plastiques :

La diminution de la viscosité avec l'augmentation du taux de cisaillement, (rhéofluidification), est observée pour la plupart des fluides non newtoniens, ils sont appelés fluides pseudo-plastiques ou fluides rhéofluidifiants, ce comportement très répandu, s'observe sur les solutions polymères et les suspensions aqueuses, les pétroles, le latex de caoutchouc, la pâte à papier, les colles, certaines peintures, etc.

Le modèle de Waele et Ostwald a été largement utilisé de façon empirique dans l'industrie, il est donné par [4] :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.9})$$

Avec : K : indice de consistance ou consistance,
 n : indice de comportement ($0 < n < 1$).

Dans le modèle d'Ostwald, la viscosité s'exprime par :

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (\text{I.10})$$

Le cas où $n=1$ correspond au comportement newtonien. Il est judicieux de tracer le rhéogramme en coordonnées log-log. Où la pente de la droite donne l'exposant n et l'ordonnée à l'origine la constante K .

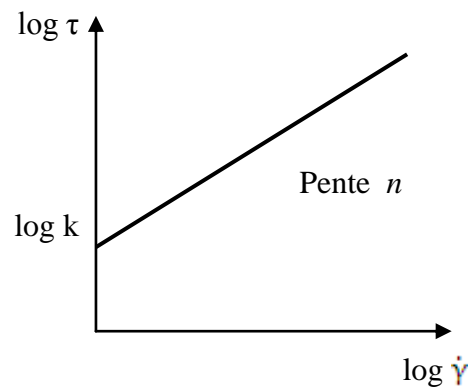


Figure I.4 : Rhéogramme d'un fluide rhéofluidifiant en loi de puissance [4].

I.3.2.1.2 Fluides rhéoépaississants :

Au contraire des fluides rhéofluidifiants, leur viscosité apparente augmente avec la contrainte de cisaillement ; mais, comme eux, ils peuvent également présenter un domaine newtonien initial et final .Une équation du type équation d'Ostwald (loi de puissance) [4] :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.13})$$

avec : $n > 1$

Ce type de comportement a été primitivement mis en évidence sur les suspensions de forte teneur en solide. Au repos, le volume libre entre les particules est minimal et ce volume libre est occupé par du liquide qui lubrifie le mouvement des particules au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement croît.

La structure solide devient de plus en plus lâche et le liquide est en défaut dans les lacunes (il y a gonflement du fluide). Aux frottements solide-liquide initiaux se substituent partiellement des frottements solides –solides qui accroissent rapidement la viscosité apparente.

Le comportement rhéoépaississant (encore appelé dilatant) est défini par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut [3].

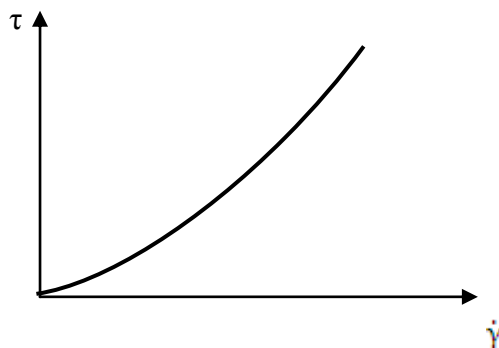


Figure I.5 : Comportement d'un fluide épaississant.

I.3.2.1.3 Fluides plastiques :

Ils sont caractérisés par une contrainte de cisaillement seuil τ_c au-dessous de laquelle l'écoulement est impossible.

a) Fluides plastiques idéal ou de Bingham :

La courbe d'écoulement est caractérisée par un taux de déformation linéaire de la contrainte lorsque cette contrainte dépasse un seuil τ_c , on peut alors obtenir l'équation rhéologique d'état qui est celle d'un liquide de Bingham [3] :

$$\tau - \tau_c = \eta_p \dot{\gamma} \quad (\text{I.11})$$

Avec : η_p est la viscosité plastique

Le liquide de Bingham a une propriété qui est celle d'un corps qui ne commence à s'écouler qu'au-delà du seuil d'écoulement : il ne présente pas de déformation permanente pour des contraintes plus faible. Lorsqu'on dépasse le seuil d'écoulement il ressemble à un liquide Newtonien, c'est-à-dire que l'augmentation de la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$ provoque l'augmentation proportionnelle de τ .

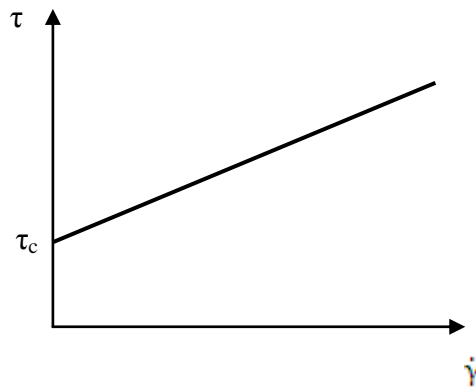


Figure I.6 : Comportement d'un fluide Bingham.

b) Fluides plastiques non idéal ou de Casson :

Ces liquides possèdent également un seuil d'écoulement comme les fluides de Bingham, mais ne présentent pas au-delà de ce seuil un comportement Newtonien, leur fluage est décrit par l'équation rhéologique suivante:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\eta_p \dot{\gamma}} \quad (\text{I.12})$$

La viscosité η_p et la contrainte critique de seuil τ_c peuvent être déterminées directement d'après le pseudo-Rhéogramme en coordonnées bi-logarithmiques [3].

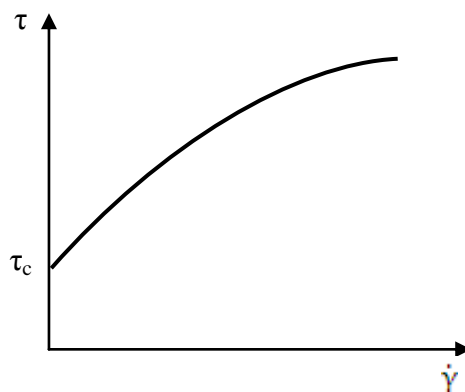


Figure I.7 : Comportement d'un fluide de casson.

c) Fluides de Herchel-Bukley :

Ces fluides sont plus compliqués et peuvent être décrits à l'aide de trois paramètres rhéologiques τ_c , K et n . Leur fluage est représenté par la formule suivante

$$\tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.13})$$

Ils sont caractérisés par le rhéogramme de la figure I.8.

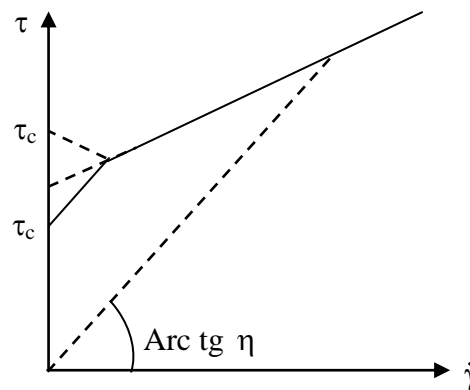


Figure I.8 : Rhéogramme d'un fluide de Herchel-Bulkley

I.3.2.2 Fluides non newtoniens dépendants du temps (avec hystérésis) :

Lorsque la variation de la viscosité par rapport à la vitesse de cisaillement est superposée par une variation dépendante du temps de cisaillement, on parle donc de fluide à comportement dépendant du temps [3].

Le mode expérimentale adopté pour tracer des courbes d'écoulement revêt une grande importance. Lorsque le rhéogramme obtenu représente toujours la même courbe quelque soit le temps mis pour atteindre les différentes contraintes ou vitesse de cisaillement de le mesure. On dit que ce corps ne présente pas d'hystérésis (il n'a pas d'histoire), par contre si la courbe de retour ne coïncide pas avec la courbe d'aller, on dit que le corps présente d'hystérésis [4].

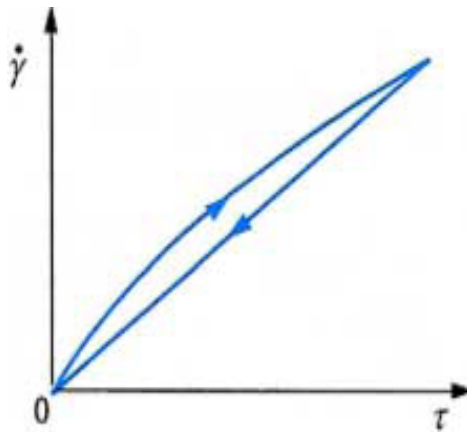


Figure I.9 : Rhéogramme d'un fluide non newtonien dépendant du temps [4].

On distingue deux catégories dans ce type de fluide :

- Les fluides thixotropiques,
- Les fluides anti- thixotropiques.

I.3.2.2.1 Fluides thixotropique :

Une substance est dite thixotropique, lorsque sa viscosité n'est plus fixée pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement mais dépend également d'un autre paramètre qui est le temps [3].

Exemples : Peintures, pâtes agro-alimentaires, fluides biologiques, etc...

Si l'on applique une déformation constante, les contraintes décroissent avec le temps. La consistance du matériau dépend du gradient et de la durée d'application de la contrainte, tout en supposant que la structure originale se reforme après un certain temps de repos. Ce comportement peut être expliqué par une destruction progressive de la structure. Si cette structure peut se reformer et la viscosité retrouve sa valeur initiale après un temps de repos à contrainte nulle, le fluide est dit thixotropique. [3]

I.3.2.2.2 Fluides anti- thixotropiques :

C'est le cas inverse des fluides thixotropiques, les fluides anti- thixotropiques ont une viscosité qui croît avec le temps d'application à contrainte τ ou à vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ donnée. Ces substances sont assez rares [4].

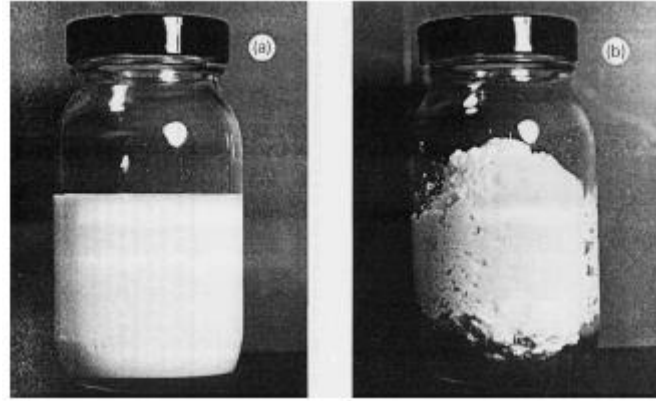


Figure I.10 : Fluide anti-thixotrope : (a) Au repos ; (b) Après une forte agitation [4].

I.3.3 Les fluides viscoélastiques :

Un fluide viscoélastique est un matériau qui possède à la fois des propriétés visqueuses et élastiques, les grandeurs caractérisant ces propriétés étant dépendantes de la durée d'application de la déformation ou de la contrainte.

Le modèle le plus simple de fluide viscoélastique consiste à additionner les contraintes d'origine élastique et les contraintes d'origine visqueuse :

$$\tau = \tau_{\text{élast}} + \tau_{\text{visco}} = E \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{I.14})$$

où E est un module d'élasticité et γ est la déformation.

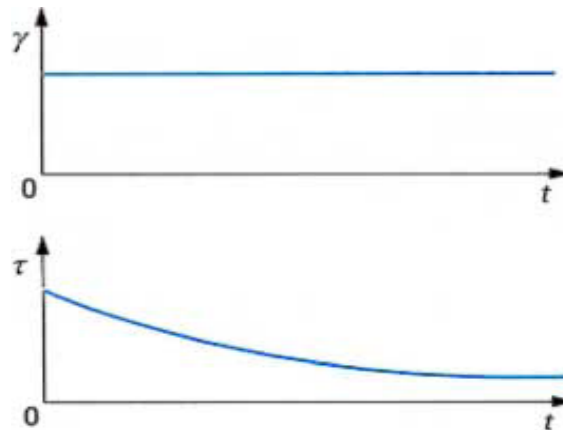


Figure I.11 : Relaxation d'un corps viscoélastique [4].

I.4. PRINCIPE ET DESCRIPTION DES PRINCIPAUX RHEOMETRES :

I.4.1. Définition d'un rhéomètre :

Les rhéomètres sont des appareils où lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces (coaxiales, plan/plan ou corne /plan) solides l'une au repos et l'autre mobile. [4]

Le rhéomètre permet d'étudier l'effet des propriétés des particules d'une suspension [concentration (fraction volumique Φ) (équation de Krieger-Dougherty), taille, distribution de taille, forme et charge des particules] sur les propriétés rhéologiques. [2]

I.4.2. Domaine d'application du rhéomètre :

Les rhéomètres sont surtout utilisés en recherche et développement, par exemple en formulation d'adhésifs, d'huiles, de bitumes, de peintures, de cosmétiques, ou pour le suivi de réticulation d'une résine thermodurcissable (mesure de la viscosité minimale, du temps de gel...). [2]

Les rhéomètres peuvent être classés en trois catégories :

- Les rhéomètres à régime permanent : utilisés comme viscosimètres, ils permettent néanmoins d'obtenir des rhéogrammes pour des liquides.
- Les rhéomètres à régime transitoire permettent l'étude de la viscoélasticité des matériaux.
- Les rhéomètres dynamiques qui fonctionnent en régime sinusoïdal forcé sont sûrement ceux qui fournissent le plus de renseignements des matériaux.[5]

I.4.3. Rhéomètre a régime permanant :

I.4.3.1 Rhéomètre de type de couette :

I.4.3.1.1. Rhéomètre plan a translation:

a) Principe de fonctionnement :

La substance à étudier est placée entre deux plans solides « P_1 » et « P_2 » parallèles et de même surface, une force « F » appliquée à l'un des plans lui communique un mouvement de translation de vitesse « V_0 », un mouvement laminaire de cisaillement est engendré, en supposant que la distance « e » entre les deux plans est faible devant les dimensions des plans, la répartition de la vitesse est linéaire et le matériau se décompose en plans parallèles aux surfaces « P_1 » et « P_2 ». [4]

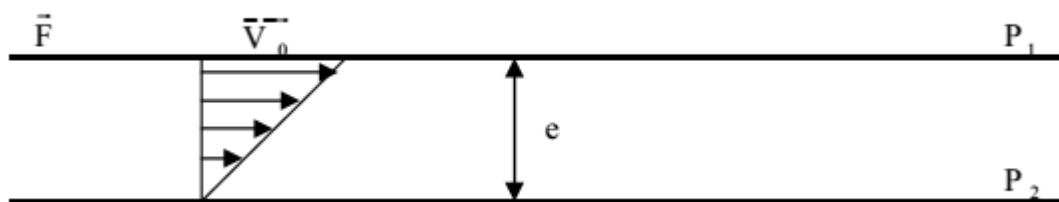


Figure.I.12 : Rhéomètre plan à translation.

I.4.3.1.2. Rhéomètre rotatif cylindrique :



Figure.I.13 : Rhéomètre rotatif.[4]

a) Description d'un rhéomètre rotatif :

Un rhéomètre rotatif est constitué d'un axe de rotation lié à un moteur, qui peut être à vitesse ou à couple imposé, et d'une cellule de mesure. La cellule de mesure est composée d'une partie mobile liée à l'axe de rotation (le rotor) et d'une partie fixe (le stator), le fluide complexe est confiné dans l'espace compris entre le rotor et le stator (entrefer). Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement rotatif uniforme de vitesse angulaire « ω », l'autre cylindre étant fixe.

b) Principe de fonctionnement d'un rhéomètre cylindrique :

La substance est placée entre deux cylindres coaxiaux de rayons R_1 et R_2 , qui se décompose en couches cylindriques coaxiales de vitesses angulaires différentes, variant de « $\omega \approx 0$ » au niveau du godet à « ω » au niveau du cylindre mobile.

Deux grandeurs sont directement mesurables qui sont le couple moteur «M» (mesurée ou imposée) qui entraîne le rotor, il est relié à la contrainte τ et la vitesse angulaire « ω » (mesurée ou imposée), elle est liée à la vitesse de cisaillement. [4]

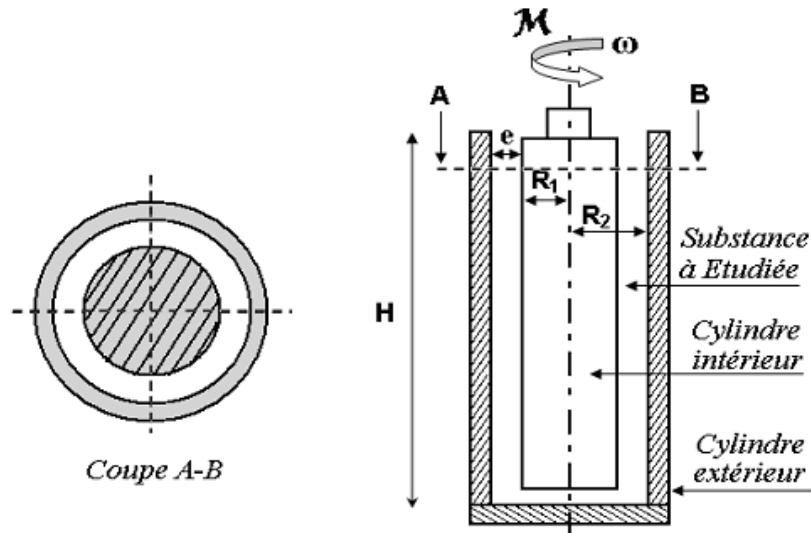


Figure.I.14 : Schéma d'un rhéomètre coaxial cylindrique intérieur rotatif.

c) Equation générale pour la détermination de τ et $\dot{\gamma}$: [8]

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{2\Omega}{\left(\frac{d \ln c}{d \ln \Omega}\right)}$$

$$\tau(r) = \frac{c}{2\pi r^2 h} \quad (\text{I.17})$$

I.4.3.1.3. Rhéomètre rotatif à cône/plateau : [4]

a) description d'un rhéomètre rotatif à cône/plateau :

Rhéomètres rotatifs à cône – plateau, il représente une bonne précision, la substance à étudier est emprisonnée entre un plateau et un cône de révolution de rayon «R» dont l'axe est perpendiculaire au plateau, l'angle comprise entre la génératrice du cône et le plateau est inférieure 5° et peut descendre jusqu'à 0,3°.

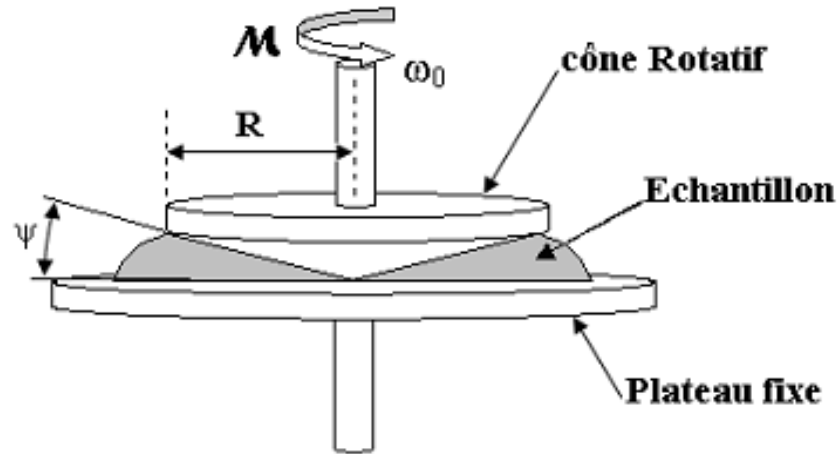


Figure.I.15: Schéma d'un rhéomètre rotatif à cône plateau.

b) Equation générale pour la détermination de τ et $\dot{\gamma}$:[8]

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{2\Omega}{\left(\frac{d \ln c}{d \ln \Omega}\right)}$$

$$\tau(r) = \frac{c}{2\pi r^2 h} \quad (\text{I.18})$$

I.4.3.2. Rhéomètre de type de poiseuille :

Cette classe de rhéomètre, de mise en œuvre relativement simple, est utilisée surtout comme «viscosimètres» pour des mesures rapides de viscosité absolue de liquides newtoniens.

Dans ce type de rhéomètres, le mouvement de cisaillement est engendré en imposant une différence de pression entre les deux extrémités d'un tube cylindrique faible section circulaire, dans lequel est contenue la substance. [7]

I.4.3.3. Viscosimètre à chute de bille :



Figure.I.16: viscosimètre à chute de bille.

Le viscosimètre à chute de bille se compose de trois tubes transparents montés sur un support métallique. Au sommet de chaque tube un lâcher automatique assure un bon centrage de la bille, et à la base un dispositif à doubles vannes pour faciliter la récupération des billes. Derrière les tubes, un panneau lumineux gradué permet un bon repérage du passage de la bille et une mesure précise de la hauteur de chute. Un chronomètre est livré avec l'appareil, ainsi qu'un jeu de billes de différents matériaux. [4]

I.4.4. Rhéomètre a régime transitoire :

Les rhéomètres à régime transitoire sont utilisés essentiellement pour déterminer le comportement viscoélastique des matériaux linéaires. Dans de tels rhéomètres, on soumet l'échantillon à une oscillation instantanée qui est maintenue constante, et l'on étudie son comportement dans les instants qui suivent.

Il existe deux types de rhéomètre transitoires :

Le rhéomètre à fluage est capable d'imposer à un instant donné une contrainte τ connue, et de mesurer l'évolution dans le temps de la vitesse de déformation.

Le rhéomètre de relaxation, est capable d'imposer une déformation $\dot{\gamma}$ constante connue, et de mesurer l'évolution de la contrainte de cisaillement dans le temps. [4]

I.4.5. Rhéomètre dynamique (ou oscillant) :

Dans les rhéomètres dynamiques, les échantillons étudiés sont soumis à des mouvements laminaires de cisaillement d'amplitude variant sinusoïdalement dans le temps.

On peut distinguer deux types d'appareils selon que le mouvement ou non :

Les rhéomètres à oscillations forcées qui peuvent fonctionner dans toute une gamme de fréquences ou à une seule fréquence particulière (rhéomètres résonants).

Les rhéomètres à oscillation libres qui permettent de mesurer de faibles viscosités par l'étude de l'amortissement.

On soumet les échantillons à des mouvements laminaires de cisaillement, d'amplitude variant sinusoïdalement dans le temps. [4]

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] **ANDRE LALLEMAND**, « Écoulement des fluides, Étude physique et cinématique », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique.
- [2] **CLAUDE WOLFF, DOMINIQUE DUPUIS**, « Viscosité », Techniques de l'ingénieur (R 2 350). Traité Génie énergétique.
- [3] **COUSSOT P., J-L GROSSIORD**, « Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton », **article** : Des concepts aux outils, J.-L. GROSSIORD' et D. QUEMADA.
- [4] **G. COURRAZE ; J. L. ROSSIORD** « Initiation à la rhéologie » Tech et doc 1991.
- [5]] [Http://Patrick.Kohl.Pagesperso-Orange.Fr/Rheologie/Rheo](http://Patrick.Kohl.Pagesperso-Orange.Fr/Rheologie/Rheo).
- [6] <http://www.universalis.fr/encyclopedie/rheologie>.
- [7] **MICHEL ROQUES**, « Contrôle Industriel et Régulation Automatique, Mécanique des fluides », 2005.
- [8] **N.MIDOUX**, Mécanique Et Rhéologie Des Fluides En Génie Chimie, Technique Et Documentation-Lavoisier, 1985.